

# STD-11 합금공구강의 뜨임 온도에 따른 동적 파괴특성 연구

## The Study of Dynamic Fracture Characteristics for Tempering Temperature of STD-11

김 선 용\*

S. Y. Kim

(1996년 3월 16일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

### ABSTRACT

This study is to evaluate dynamic fracture characteristics of alloy tool steel, STD-11, according to various tempering conditions (heat treatment). The dynamic fracture initiation toughness and some of the dynamic fracturing characteristics were evaluated by using the instrumented Charpy impact testing procedures.

The distributions of Vickers hardness and dynamic fracture initiation toughness with respect to varying tempering temperatures are found to be symmetric type with the help of experimental results for the STD-11. It is also found that the dynamic fracture initiation toughness is a inverse proportion to Vickers hardness. In this experimental study, it is found that the best heat treatment condition is 550°C tempering in alloy tool steel, STD-11, because the results show high values of Vickers hardness and dynamic fracture initiation toughness.

### 1. 서 론

여러가지 공학재료의 기계적, 물리적 특성은 하중 상태, 온도 등 재료가 사용되는 여러가지 조건에 적합하게 대응되도록 결정되어야 한다. 일반적으로 프레스 금형의 다이와 펀치로 많이 사용되고 있는 STD-11 합금공구강은 여러가지 뜨임온도에

서 뜨임처리를 하여 사용되고 있다. 프레스 다이와 펀치 재료는 동적하중을 받으면서 파손되는 경우가 많으므로 동적하중에 대한 파괴특성이 규명되어야 한다. 이러한 동적 파괴특성을 규명하는 한 방법으로써 계장화 샤피 충격시험(Instrumented Charpy Impact Test)이 많이 이용되고 있으며 이 방법으로 비교적 쉽게 동적 균열개시인성치 ( $K_{Id}$ )

\* 유한전문대학 금형설계과

를 산정할 수 있다고 알려져 있다<sup>1-3)</sup>. 본 연구에서는 샤피 충격시험기의 텡(Impact Tup)에 스트레인 게이지를 붙여 스트레인 측정회로를 구성한 후, 충격텡으로부터 얻어지는 스트레인 신호를 정적보정 프로세스를 이용하여 하중으로 환산하였다. 본 연구에서는 충격텡의 계장화 회로에서 계측되는 신호를 스트레인 증폭기로 증폭하고 저장용 오실로스코프에 기록한 다음, 이를 분석하여 동적 균열개시인성치를 산출하여 STD-11 강의 뜨임온도에 따른 동적 파괴특성을 규명하였다.

## 2. 기본이론

Fig. 1에 계장화 샤피 충격시험으로 얻게 되는 두 가지의 전형적인 텡(tup)하중-시간 곡선을 나타내었다. Fig. 1(a)에서 하중은 파괴가 개시되는 최대하중에 도달할 때까지 하중이 선형적으로 증가하는데, 이와 같이 최대하중에 도달할 때까지 항복이 일어나지 않으면 동적 균열개시인성치( $K_{Id}$ )는 선형탄성 파괴역학을 이용하여 식(1)과 같이 결정할 수 있다<sup>1-3)</sup>.

$$K_{Id} = Y \frac{6M}{tB^2} \sqrt{a} \dots\dots\dots (1)$$

$$Y = 1.93 - 3.07 \left(\frac{a}{B}\right) + 14.53 \left(\frac{a}{B}\right)^2 - 25.11 \left(\frac{a}{B}\right)^3 + 25.8 \left(\frac{a}{B}\right)^4$$

여기서, M은 작용한 굽힘 모멘트( $P_m L/4$ ),  $P_m$ 은 최대하중, B는 시편의 폭, t는 시편의 두께, a는 균열 길이이고, L은 스펠(Span)의 거리이다 (Fig. 3 참조). Fig. 1(b)는 파괴가 개시되는 최대하중에 도달하기 전에 소성 변형이 발생하는 양상이며 이 상태에서는 식(1)을 사용하여 동적 균열개시인성치를 구할 수 없다. 이 경우에는 Witt에 의해 개발된 등가에너지 방법을 이용하여 동적 균열개시인성치를 결정한다<sup>4)</sup>. 여기서 등가에너지는 파괴개시 전에 발생하는 항복을 피할 수 있을 정도로 충분히 두꺼운 시편을 가정하여 (평면변형률 조건) 이 시편이 최대하중에 도달하기에 필요한 에너지의 상당량을 의미한다. 즉 등가에너지 방법을 이용하여 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 동적 하중-시간 곡선의 직선 부분을 연장하여  $P_m$ 까지의 에너지와 일치하는 직선 부분 연장 끝 점의 하

중  $P^*$ 를 결정한다. 여기서 구한  $P^*$ 를 식(1)의  $P_m$ 에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정한다.

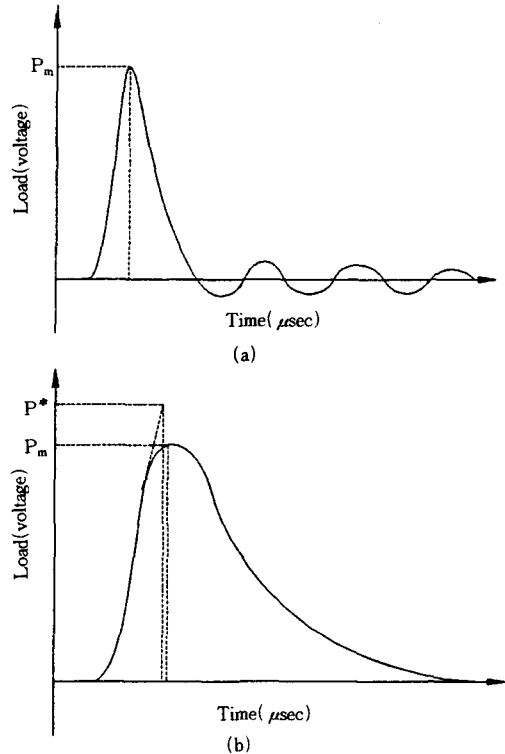


Fig. 1 Typical tup load-time history for instrumented Charpy impact test

동적 균열개시인성치와 충격시험기의 흡수에너지 사이에는 저속 굽힘에너지와 저변형률속도 인성측정법을 사용하여 Ronald 등에 의해 밝혀진 식(2)와 같은 관계가 있다<sup>5-7)</sup>.

$$K_{Id} = \sqrt{\frac{E}{2(1-\nu^2)}} (W/A)_d \dots\dots\dots (2)$$

위 식은 파면 형상이 전단 면적이 거의 없는 평면 파괴(Flat Fracture) 현상을 나타낼 때 적용할 수 있으며, 여기서 E는 탄성계수,  $\nu$ 는 포와송비,  $(W/A)_d$ 는 시편의 흡수에너지를 나타낸다.

식(2)를 이용하면 계장화된 충격시험의 결과를 이용하지 않고 동적 균열개시인성치를 결정할 수

있으나 시편의 파면 형상에 극도의 전단립(Shear Lip)이 나타날 경우, 정확한 값을 구하기 위해서는 계장화된 충격시험을 이용하여 얻은 턱하중-시간 곡선 결과를 이용해야 한다.

### 3. 실험방법

본 연구에서는 STD-11 합금공구강의 뜨임 온도에 따른 동적 파괴특성을 규명하는 실험을 수행하였다. 시험편은 두께 10.5mm로 밀링 가공하였으며 제작된 시험편을 전기로(Muffle furnace, 10kW, Max 1175°C, Wild Barfield, England)에 탈탄 방지를 위해 상자 열처리를 하였다. 경화처리를 위하여 650°C로 1시간 예열 후, 1025°C로 가열하여 1시간 30분 동안 유지하였다. 가열 작업이 끝난 후, 취출하여 공기중에서 서냉하였다. 경화처리 직후 시험편을 전기로(15kW, Max 700°C)에 뜨임처리를 위하여 뜨임온도에서 1차 뜨임처리 후 2차 뜨임처리를 하였다.

용량이 300 Joule인 계장화된 Charpy 충격시험기로 시편에 충격하중을 가하면 시편과 턱의 접촉순간 하중으로부터 파단 하중까지 빠르게 변화하는 하중을 정확히 측정할 수 있다. 계장화 살피 충격시험기는 충격시험기의 턱에 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge) 회로를 구성하여 제작하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 턱부분에 두 개의 액티브게이지(Active Gage)를 부착하였고, 두 개의 더미게이지(Dummy Gage)는 액티브게이지(Active Gage)와 직각이 되도록 부착하였다. 계장화 충격턱으로부터 나오는 신호를 스트레인 증폭기(Measurement Group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프(Nicolet Pro 90)에 기록하였다. Fig. 3에 본 연구에서 사용한 표준 살피 충격시편의 형상을 나타내었으며, 실험에 사용한 살피 충격시편의 V노치는 Wire E. D. M. 가공을 한 후 연질층을 없애기 위하여 연삭 가공을 하였으며, 노치 끝 반경은 0.105mm이었다.

분리가 가능하도록 충격턱을 제작하였으며, 이 충격턱에 스트레인 회로를 구성하여 계장화한 후 만능 재료시험기로 압축하중을 가하면서 얻은 결과로 보정을 하였다. 동적하중 측정시 가장 중요한 사항의 하나로 알려져 있는 스트레인 증폭기는

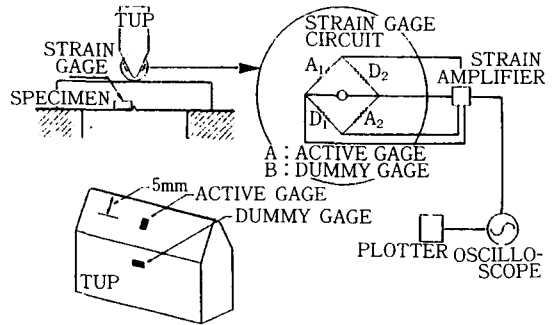


Fig. 2 Layout of instrumented Charpy impact test system including full bridge circuit

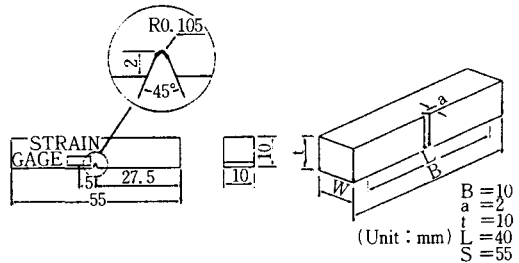


Fig. 3 Configuration of Charpy specimen and location of strain gage

출력신호 대역폭(Output Bandwidth)이 125kHz의 출력 특성을 갖는 증폭기를 사용하였다.

본 연구에서는 계장화 살피 충격시험 장치를 사용하여 해머 충격속도를 2.8m/s로 하고, STD-11 강 of 뜨임 온도에 따른 턱하중-시간 곡선을 기록하여 균열개시 하중을 구한 다음, 균열개시 하중을 식(1)에 대입하여 동적 균열개시인성치를 산정하였다. 뜨임온도와 동적 균열개시인성치, 뜨임온도와 경도, 경도와 동적 균열개시 인성치의 관계를 비교하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

STD-11 합금공구강의 열처리 조건에 따른 동적 파괴특성을 평가하기 위하여 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 550°C 뜨임처리한 시편의 동적 하중과 동적 변형률 실험결과를 Fig. 4~Fig. 8에 나타내었다.

STD-11 강을 200°C로 뜨임처리하였을때, 용량

300 Joule인 샷피 충격시험기를 사용하여 충격속도를  $v=2.8\text{m/s}$ 로 실험한 충격 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 매우 짧은 시간의 변화에 따라서 텡하중(kN)의 변화 양상을 나타내었고(실선), 균열개시점을 확인하기 위하여 시편에 스트레인 게이지를 부착하여 얻은 스트레인 값( $\mu\epsilon$ )을 시간에 따라 나타내었다(점선). 텡하중-시간 곡선에서 관성력에 의한 하중은 4.25kN이었고, 그 지연시간은  $28\mu\text{sec}$ 이었다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최대 스트레인으로 부터 스트레인이 급격히 떨어지는 시간과 텡하중-시간 곡선에서 텡하중이 지연되는 시간이  $75\sim 77\mu\text{sec}$ 로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 텡하중-시간 곡선에서 균열개시 하중은 5.52kN이고, 이 값을 식(1)에 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치는  $25.1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이었다. 따라서 어느 재료의 동적 파괴특성을 평가하기 위해서는 스트레인 곡선과 텡하중 곡선으로 그 경향을 알고 난 후 텡하중-시간 곡선만을 이용하여 균열개시 하중을 구할 수 있고, 이 값을 이용하여 동적 균열개시인성치를 산정할 수 있다.

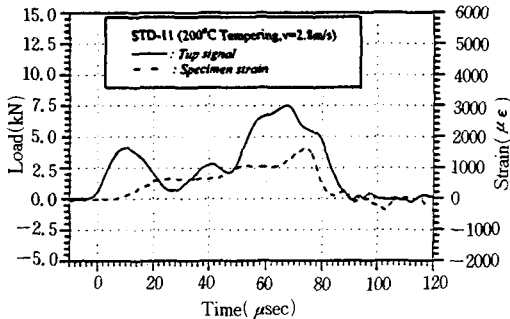


Fig. 4 Tip load(kN) vs. time and specimen strain( $\mu\epsilon$ ) vs. time trace for 200°C tempering temperature (impact velocity  $v=2.8\text{m/s}$ )

STD-11 강을 300°C로 뜨임처리하였을 때의 충격시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 텡하중-시간 곡선에서 관성력에 의한 하중은 4.25kN이었고, 그 지연시간은  $28\mu\text{sec}$ 이었다. 텡하중-시간 곡선에서 지연시간은  $71\sim 75\mu\text{sec}$ 이었고, 텡하중-시간 곡선에서 균열개시 하중은 6.18kN이고, 이 값을 식(1)

에 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치는  $29.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이었다.

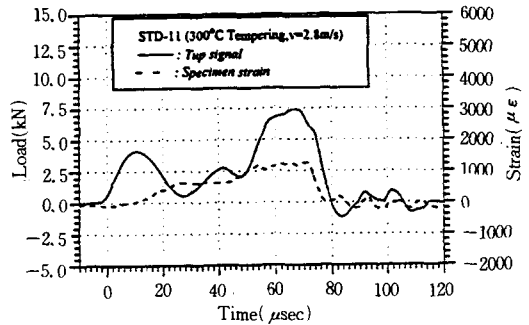


Fig. 5 Tip load(kN) vs. time and specimen strain( $\mu\epsilon$ ) vs. time trace for 300°C tempering temperature (impact velocity  $v=2.8\text{m/s}$ )

STD-11 강을 400°C로 뜨임처리하였을 때의 충격시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 텡하중-시간 곡선에서 관성력에 의한 하중은 4.25kN이었고, 그 지연시간은  $28\mu\text{sec}$ 이었다. 텡하중-시간 곡선에서 지연시간은  $69\sim 78\mu\text{sec}$ 이었고, 텡하중-시간 곡선에서 균열개시 하중은 6.57kN이고, 이 값을 식(1)에 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치는  $29.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이었다.

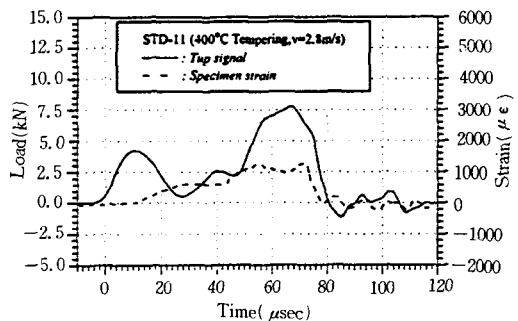


Fig. 6 Tip load(kN) vs. time and specimen strain( $\mu\epsilon$ ) vs. time trace for 400°C tempering temperature (impact velocity  $v=2.8\text{m/s}$ )

STD-11 강을 500°C로 뜨임처리하였을 때의 충격시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

딥하중-시간 곡선에서 관성력에 의한 하중은 4.25kN이었고, 그 지연시간은 28  $\mu\text{sec}$ 이었다. 딥하중-시간 곡선에서 균열개시 지연이 나타나는 시간은 54~59  $\mu\text{sec}$ 로 200 $^{\circ}\text{C}$ , 300 $^{\circ}\text{C}$ , 400 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리한 경우에 비하여 약 16  $\mu\text{sec}$  정도 빨리 균열이 개시되었다. 딥하중-시간 곡선에서 균열개시 하중은 3.45~8.28kN으로 폭넓게 분포하였고, 이 값을 식(1)에 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치도 14.9~36.6MPa $\sqrt{\text{m}}$ 으로 폭넓게 분포하였다.

또한 200 $^{\circ}\text{C}$ , 300 $^{\circ}\text{C}$ , 400 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리하였을 때와는 달리 딥하중 곡선의 경사가 급하고 파괴되는 시간이 짧으며, 작은 하중에서 파괴됨을 알 수 있다. 이것은 500 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리할 경우 조직이 불안정하게 분포하여 취약해진 것으로 생각된다.

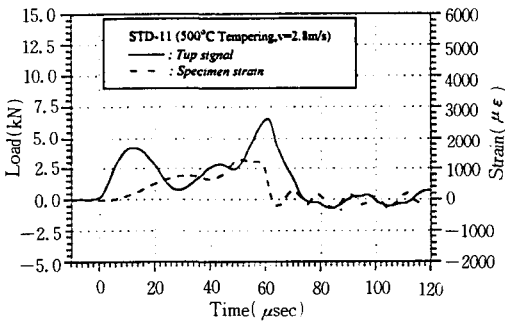


Fig. 7 Tup load(kN) vs. time and specimen strain(  $\mu\epsilon$  ) vs. time trace for 500 $^{\circ}\text{C}$  tempering temperature (impact velocity  $v=2.8\text{m/s}$ )

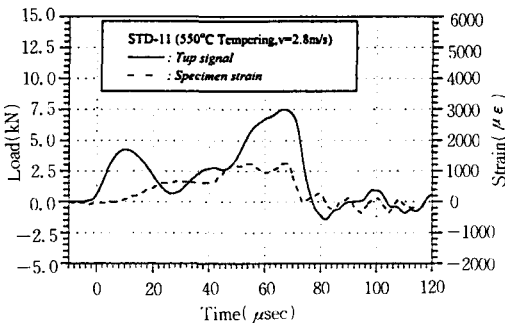


Fig. 8 Tup load(kN) vs. time and specimen strain(  $\mu\epsilon$  ) vs. time trace for 550 $^{\circ}\text{C}$  tempering temperature (impact velocity  $v=2.8\text{m/s}$ )

STD-11 강을 550 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리하였을 때의 충격시험 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

딥하중-시간 곡선에서 관성력에 의한 하중은 4.25kN이었고, 그 지연시간은 28  $\mu\text{sec}$ 이었다. 딥하중-시간 곡선에서 지연시간은 62~69  $\mu\text{sec}$ 이었고, 딥하중-시간 곡선에서 균열개시 하중은 7.49kN이고, 이 값을 식(1)에 대입하여 산정한 동적 균열개시인성치는 32.4MPa $\sqrt{\text{m}}$ 이었다.

STD-11 강의 열처리 조건에 따른 동적 파괴특성을 관찰하기 위해서 뜨임온도에 따른 비커스 정도와 동적 균열개시인성치의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 200 $^{\circ}\text{C}$ , 300 $^{\circ}\text{C}$ , 400 $^{\circ}\text{C}$ , 550 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리하였을 때는 동적 균열개시인성치가 거의 일정한 값에 수렴하나, 500 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리한 경우는 그 값이 넓게 분산되는 것을 알 수 있다. 이것은 500 $^{\circ}\text{C}$ 로 뜨임처리할 경우 조직이 불안정하게 분포하여 취약해진 것으로 생각된다.

그림에서 보는 바와 같이 비커스경도 분포양상과 동적 균열개시인성치의 분포양상은 대칭적인 것을 알 수 있다.

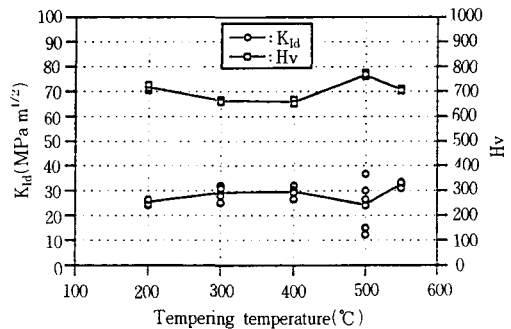


Fig. 9 Comparison between dynamic fracture initiation toughness and Vickers hardness according to the various tempering temperature

뜨임온도에 따른 비커스경도와 동적 균열개시인성치와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 동적 균열개시인성치와 비커스경도는 서로 반비례 관계가 있다는 사실을 실험적으로 증명하였다. 따라서 위의 결과를 고찰해 보면 경도값으로도 어느 정도 동적 파괴특성을 파악할 수 있으나, 동적 충격시험 결과를 이용하면 보다 쉽고 정확하게 동적 파괴특성을 알 수 있다.

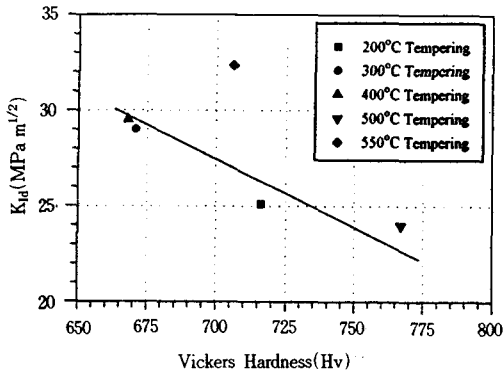


Fig. 10 Relation between dynamic fracture initiation toughness and Vickers hardness according to tempering temperature

Table 1에 나타난 바와 같이 STD-11 강을 550°C로 뜨임처리하면 비커스경도가 706(Hv)이고, 동적 균열개시인성치가 32.4MPa√m으로 나타났다. 그러므로 프레스 금형에서 마모와 파손을 모두 고려할 경우 550°C 뜨임처리하여 금형을 제작하는 것이 바람직하다고 생각한다.

Table 1 Comparison between dynamic fracture initiation toughness and Vickers hardness according to tempering temperature

Tempering Temperature (°C)	Properties	$K_{Ia}$ (MPa√m)	Hv
200		25.1	716
300		29.0	671
400		29.5	668
500		24.0	767
550		32.4	706

### 5. 결 론

본 연구에서는 STD-11 합금공구강의 열처리 조건에 따른 동적 파괴특성을 평가하기 위하여 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 550°C 뜨임처리한 후 계장화된 샤프 충격시험을 이용하여 탄하중-시간 곡선을 구하고 충격 시험편의 균열개시 하중을 결정하여 동적 균열개시인성치를 산정하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 뜨임온도의 변화에 따른 비커스경도 분포와 동적 균열개시인성치 분포는 대칭 형상을 나타내며, 동적 균열개시인성치와 비커스경도는 서로 반비례 관계가 있다는 사실을 실험적으로 증명하였다.
- 2) 본 연구의 결과를 이용하여 STD-11 합금공구강으로 프레스 금형을 제작할 때 550°C 뜨임처리하면, 동적 균열개시인성치가 가장 크고 비커스경도도 높으므로 금형의 마모와 파손을 모두 고려한 가장 좋은 조건을 구할 수 있다.
- 3) 재료의 동적 파괴특성을 평가하기 위해서는 시험편에 스트레인 게이지를 부착하여 구한 스트레인 곡선을 이용하여 균열개시 하중시간을 구한 후, 탄하중-시간 곡선을 이용하여 균열개시 하중을 구할 수 있고 이 값을 이용하여 동적 균열개시인성치를 산정할 수 있다.

본 연구는 1995년도 유한전문대학 교내 연구비에 의해 수행되었으며 관계자 제위께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) A. Ewing and L. Raymond, Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys, ASTM STP 563, pp. 180~202, 1974.
- 2) R. C. Lueth, An Analysis of Charpy Impact Testing as Applied to Cemented Carbide, ASTM STP 563, pp. 166~179, 1974.
- 3) 김선용, 이억섭, 홍성경, 계장화 샤프 충격시험에 의한 동적 파괴거동 해석, 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 12, pp. 64~71, December, 1995.
- 4) T. J. Koppenaar, Dynamic Fracture Toughness Measurement of High-Strength Steels Using Pre-cracked Charpy Specimen, ASTM STP 563, pp. 92~117, 1974.
- 5) B. R. Lawn and T. R. Wilshaw, Fracture of Brittle Solids, Cambridge Univ. Press, 1975.
- 6) D. R. Ireland, Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Test, ASTM STP 563, pp. 3~29, 1974.

- 7) L. Raymond, Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys, ASTM STP 563, pp. 180 ~202, 1974.
-